نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد – شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۵۱-۴۳۹

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-sEP. 2023, p. 439-451

مقاله علمی-پژوهشی

بررسی عملکرد روابط تجربی در برآورد تلفات تبخیر از تشت در محدوده دریاچه سد شهید رجایی ساری

سیده نعیمه سیدی[۱]، رامین فضل‌اولی[۲*]، محسن مسعودیان[۳]، عیسی کیاء[۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۹

چکیده

تبخیر به‌عنوان یکی از مؤثرترین و حجیم‌ترین عوامل تلفات در منابع آبی بوده و با محاسبه دقیق آن می‌توان راهکارهای مؤثری را در جهت کاهش اثرات خشکسالی و به‌منظور حفاظت و مدیریت کارآمد منابع آبی اجرا نمود. در این تحقیق روابط تجربی رایج در برآورد میزان تبخیر روزانه و ماهانه برای چهار ایستگاه سلیمان‌تنگه، محوطه اداره ساری، فریم صحرا و تلمادره بر مبنای داده‌های مشاهده شده تشت تبخیر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت و بهترین روابط تجربی برای تخمین مقادیر روزانه و ماهانه تبخیر معرفی شد. برای این منظور آمار ۱۰ ساله مقادیر اندازه‌گیری شده تبخیر از تشت با مقادیر محاسبه شده از روش‌های تجربی مایر، مارسیانو، شاهتین، هفنر، ایوانف و دفتر عمران آمریکا، با دو مقیاس زمانی روزانه و ماهانه با هدف تخمین تلفات ناشی از تبخیر از سطح دریاچه سد شهید رجایی ساری، مورد مقایسه قرار گرفت. سپس عملکرد روابط تجربی بر اساس آماره‌های MSE، R^2 و EF مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی روابط تجربی محاسبه تبخیر نشان داد که روش مایر در ایستگاه‌های مورد مطالعه بهترین رابطه برای برآورد تبخیر روزانه است. بعد از رابطه تجربی مایر، رابطه ایوانف به‌عنوان بهترین رابطه معرفی شد. مقادیر آماره‌های MSE، R^2 و EF در برآورد تبخیر ماهانه با استفاده از رابطه مایر در ایستگاه سلیمان‌تنگه که نزدیک‌ترین ایستگاه به سد شهید رجایی بوده به‌ترتیب برابر با ۴۳۶/۹، ۰/۹۷ و ۰/۳ به‌دست آمد. همچنین از بین روش‌های تجربی مورد استفاده در این مطالعه، روش دفتر عمران آمریکا به‌عنوان ضعیف‌ترین معادله جهت برآورد تبخیر ماهانه در ایستگاه سلیمان‌تنگه تعیین شد.

واژه‌های کلیدی: تبخیر روزانه، تبخیر ماهانه، تشت تبخیر، روابط تجربی

مقدمه

یکی از منابع آبی مهم تأمین‌کننده آب شرب، صنعت و کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آب ذخیره شده در دریاچه پشت سدهای احداث شده بر روی رودخانه‌ها است. از جمله روش‌های هدررفت آب در مخازن سدها، تبخیر از سطح آن‌ها بوده و می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در مدیریت منابع آبی ایفا کند (Eslamian et al. 2008). همان‌گونه که در منابع ذکر شده، ایران کشوری است که با کمبود بارش مواجه بوده و تلفات تبخیر نقش مهمی در بیلان مخازن سدها دارد. به همین جهت باید تا حد امکان میزان تلفات تبخیر از مخازن سدها را کاهش داد. با توجه به این که سدها نقش بسیار مهمی در تأمین آب کشاورزی و آشامیدنی دارند، برآورد تبخیر از آن‌ها به روش‌های مختلف باید به یک ضرورت تبدیل گردد تا بهره‌برداری بهینه از آن‌ها صورت گیرد (سیدی، ۱۴۰۰). تبخیر یکی از فرآیندهای مهم و تأثیرگذار در چرخه آب به‌ویژه در مناطق خشک جهان است و سبب از بین رفتن بیش از نیمی از نزولات جوی در آن مناطق می شود. همچنین عمده‌ترین معیار برای تعیین درجه خشکی در یک منطقه، رابطه بین مقدار بارندگی سالانه و توان تبخیر محیط است. هر اندازه مقدار باران نسبت به تبخیر کمتر باشد، درجه خشکی آن منطقه

۱- دانش‌آموخته مقطع کارشناسی‌ارشد منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۲-دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۳-دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران
۴- پژوهشگر، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی مازندران، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ساری، ساری، ایران
(*- نویسنده مسئول: raminfazl@yahoo.com و (Email: r.fazloula@sanru.ac.ir
DOR: 20.1001.1.20087942.1402.17.3.3.1

بیشتر است (Kim and Jee, 2009). به‌جز نواحی محدودی در ایران (حاشیه دریای خزر) در سایر مناطق، توان تبخیر به مراتب بالاتر از میزان بارندگی است. در ایران حدود ۷۲ درصد از نزولات جوی روی خشکی‌ها بلافاصله تبخیر می‌شود. در مقیاس جهانی این رقم ۵۷ درصد بوده و این خود اهمیت تبخیر و تعرق، خصوصاً در مناطق با اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران را مشخص می‌کند. در طبقه‌بندی اقلیمی ایران، شهرهای تبریز و ارومیه جزء مناطق نیمه‌خشک محسوب می‌شود. به همین دلیل پیش‌بینی و تعیین مهم‌ترین عوامل مؤثر در میزان شدت تبخیر در مناطق پر اهمیت است (Tabari et al., 2019). یزدانی و همکاران (۱۳۸۹) به مطالعه‌ی تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد در اراضی شالیزاری آمل بر پایه آنالیز حساسیت و مقایسه آن با نتایج شبکه عصبی مصنوعی پرداختند. در این مطالعه برای تعیین تبخیر از سطح آزاد آب از روش های مایر، مارسیانو، شاهتین، هنفر، ایوانف، تیچومیروف، دفتر عمران آمریکا و شبکه عصبی مصنوعی استفاده و با مقادیر تبخیر از تشت مقایسه شد. با استفاده از معیارهای آماری R^2، MBE، RMSE و مقایسه نسبت به خط ۱:۱ مشخص شد که محاسبه تبخیر از سطح آزاد به روش ایوانف دارای بیشترین ضریب همبستگی با مقدار تبخیر از تشت در منطقه آمل بود. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که پس از ایوانف روش‌های مایر و تیچومیروف به‌ترتیب دقت زیادی برای برآورد تبخیر از سطح آزاد داشتند. نجفوند دریکوندی و اسلامی (۱۳۹۵) به مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب سد تنظیمی دز پرداختند. در این پژوهش از آمار ۱۰ ساله ایستگاه تنظیمی دز و روش‌های تجربی مایر، مارسیانو، شاهتین، هنفر، ایوانف، تیچومیروف و دفتر عمران آمریکا برای برآورد تبخیر استفاده شد و با مقادیر تبخیر از تشت مقایسه گردید. نتایج نشان داد که رابطه مایر در مقایسه با سایر روش‌های تجربی از دقت بالاتری برخوردار بوده و پس از مایر معادله دفتر عمران آمریکا قرار دارد و روش تیچومیروف به‌علت خطای زیاد و برازش پایین با داده‌های واقعی فاقد اعتبار بود. همچنین روابط تجربی هنفر، مارسیانو، ایوانف و شاهتین به‌ترتیب با ضریب تعیین برابر با ۰/۵۴۸، ۰/۵۳۴، ۰/۶۳۹ و ۰/۶۶۴ از میزان اعتبار و اعتماد متوسطی در برآورد میزان تبخیر از سطح آزاد آب داشتند. امام‌دوست و همکاران (۱۳۹۵) به برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در دشت مازندران (آب‌بندان دازمیر کنده) و مقایسه آن با هفت روش تجربی مایر، USBR، شاهتین، هفنر، پنمن، مارسیانو و ایوانف پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که روش ایوانف و شاهتین به‌ترتیب دارای دقت زیادی برای تعیین تبخیر از سطح آزاد در این منطقه بودند و مقادیر جذر میانگین مربع خطا، انحراف نتایج و آزمون t در بهترین مدل به‌ترتیب ۱/۳۶، ۰/۱۸، ۰/۹۵ بودند. برای تعیین بهترین ضریب تشت با توجه به دقت فرمول ایوانف برای منطقه از مقادیر روزانه تبخیر با ضرایب ۰/۶، ۰/۷، ۰/۷۵، ۰/۸، ۰/۸۵ و ۰/۹ استفاده شد. با توجه به نتایج آماری ضریب ۰/۷۵ با حداقل مقدار RMSE، MBE و t به‌عنوان بهترین ضریب برای تشت شناور انتخاب شد. وانگ و همکاران به برآورد تبخیر از سطح آب با استفاده از روش سنجش از دور (ماهواره MODIS) در مکزیک پرداختند (Wang et al., 2008). در این پژوهش از داده‌های هواشناسی محل مورد مطالعه و بیلان انرژی برای اندازه‌گیری تبخیر استفاده شد. نتایج نشان داد که روش سنجش از دور قابلیت خوبی برای برآورد تبخیر از سطح آب در تابستان و محاسبه تبخیر تعرق در منطقه مورد مطالعه داشته است. دقت برآورد تبخیر در فصل تابستان ۱/۵ میلی‌متر در روز و میانگین آن ۰/۲۴ میلی‌متر در روز برآورد شد. همچنین تبخیر میانگین در منطقه مورد مطالعه ۵/۶ میلی‌متر در روز برآورد شد. خوشحال جهرمی (۱۳۹۴) روش‌های تجربی مختلفی را برای برآورد تبخیر در دو اقلیم متفاوت استان فارس بکار گرفت و به این نتیجه رسید که روش مایر و ایوانف دقت بالاتری داشته‌اند. سلامی و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی و تحلیل حساسیت روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب سد چغاخور پرداختند. آن‌ها از روش‌های تجربی مه‌یر، مارسیانو، شاهتین، هفنر، ایوانف و سازمان عمران آمریکا برای بررسی تبخیر از سطح آزاد آب سد چغاخور استفاده کردند که نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد روش میانگین ایوانف و USBR در محاسبه تبخیر ماهانه و روش میانگین مه‌یر و شاهتین در محاسبه تبخیر روزانه به عنوان بهترین روش‌ها انتخاب گردیدند. میرمحمد صادقی و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب دریاچه سد زاینده‌رود با استفاده از سبال و مقایسه آن با روش‌های تجربی شامل مایر، مارسیانو، شاهتین، هفنر، ایوانف، تیچومیروف و روش سازمان عمران اراضی آمریکا پرداختند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور برای محاسبه تبخیر از سطح آزاد بسیار کارآمدتر از روش‌های تجربی محاسبه تبخیر در صورت عدم واسنجی پارامترها در روابط تجربی می‌باشد. ابوال مجد و علی به برآورد تلفات تبخیر در دریاچه ناصر در کشور مصر با استفاده از شبیه‌سازی نوری توسط ماهواره پرداختند. در این پژوهش از ۲۴ تصویر ماهواره‌ای در طول سال ۲۰۰۸ استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد که در مقایسه با روش پنمن مانتیث همبستگی بالایی باR^2 =0.78 به‌دست آمد که حاکی از دقت بالای روش سنجش از دور در برآورد تلفات تبخیر بود (Abou El Magd and Ali, 2012). زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از اطلاعات ۶۱ ایستگاه هواشناسی در سطح کشور، مقادیر تبخیر را از ۹ روش برآورد کردند که مقایسه تبخیر برآوردی با مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی تشت تبخیر کلاس A نشان داد روش ایوانف در بین روش های تجربی هم‌خوانی بیشتری با داده‌های واقعی دارد. وینده‌هام و استال نشان دادند به کارگیری مدل هفنر در برآورد تبخیر از سطح آزاد دریاچه ایلی نویز منجر به نتایج مناسبی نشد (Windham and Stall, 1967). بورن و هسچ روش تجربی مایر را به دلیل سادگی و

عدم نیاز به داده تابش، مناسب‌ترین روش تجربی بررسی روند تبخیر در کانادا معرفی کردند (Burn and Hesch, 2007). در تحقیقات یزدانی و همکاران و جلالی کوتنایی و همکاران فرمول ایوانف را برای مناطق اقلیم مرطوب بهترین روش تجربی از سطح آزاد آب از بین سایر روش‌های تجربی معرفی نمودند (Yazdani et al., 2010; Jalali Koutenai et al., 2010). بنابراین با توجه به این‌که تاکنون تحقیقی در مورد برآورد تلفات تبخیر از سد شهید رجایی انجام نشده است و با توجه به وجود دریاچه بزرگ پشت سد که از تبخیر قابل توجهی برخوردار است، هدف این تحقیق در این تحقیق جهت ارزیابی عملکرد روش‌های تجربی، نتایج حاصل از برآورد تبخیر با مقادیر مشاهداتی تبخیر از تشت مورد مقایسه قرار گرفت

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مطالعاتی

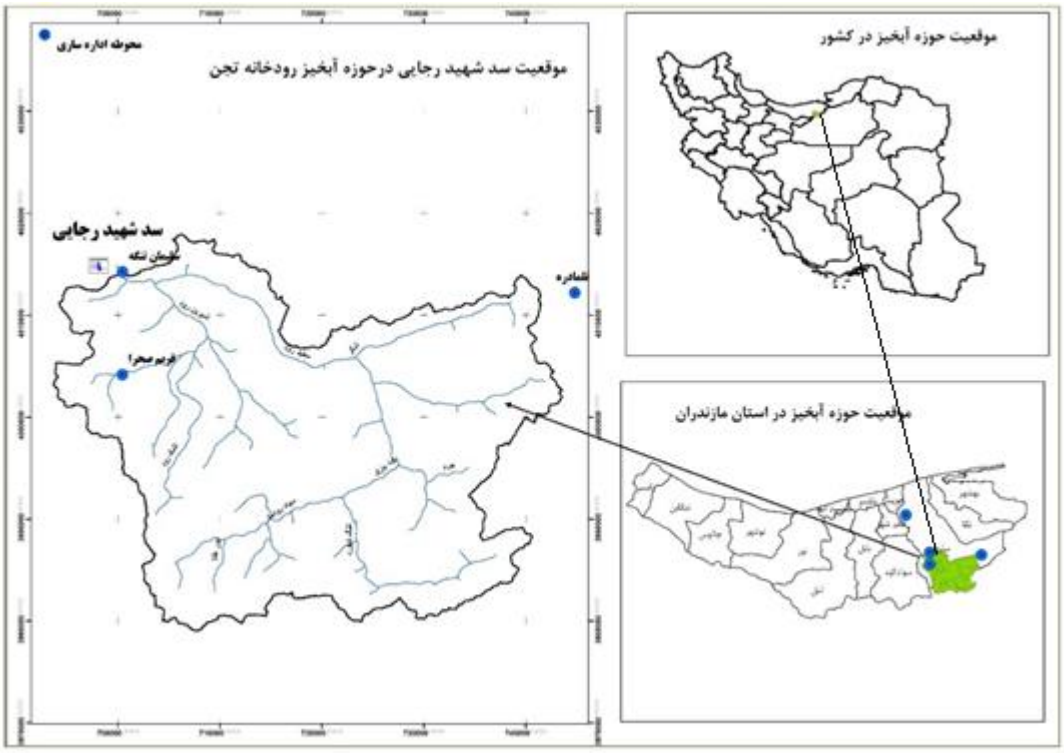
سد شهید رجایی (سلیمان تنگه) بر روی رودخانه دودانگه از سرشاخه‌های رودخانه تجن مازندران و در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه های البرز و در محل تنگه آهکی موسوم به سلیمان تنگه در میان روستاهای افراچال (در بالادست) و لولت (در بالادست) احداث شده و فاصله این محل از دهانه تجن در کناره دریای خزر ۷۰ کیلومتر است. شاخه دودانگه رودخانه تجن مازندران از ارتفاعات کوه‌های سیاه‌کوه و تروآ سرچشمه گرفته و پس از تلاقی با تعدادی از شاخه‌های فرعی به نام سفیدرود و لنگرود از جنوب شرقی به شمال غربی جریان و در نهایت پس از عبور از محل سلیمان تنگه و پیوستن شاخه‌های فرعی دیگر به نام لاجیم و چهاردانگه به دریای مازندران در محل کردخیل تخلیه می‌شود. این سد در ۴۰ کیلومتری جنوب شهر ساری بر روی رودخانه تجن با هدف تأمین نیاز شرب و بهداشت، صنعت، محیط زیست و کشاورزی منطقه احداث شده و در حال بهره‌برداری است. مساحت حوضه آبریز این سد بالغ بر ۱۲۴۴ کیلومتر مربع و دارای حجم مخزن ۱۶۲/۳ میلیون متر مکعب و آبدهی طبیعی ورودی برابر با ۲۳۱ میلیون متر مکعب برای تنظیم بالغ بر ۲۱۲ میلیون متر مکعب در سال برنامه‌ریزی شده است. این سد از نوع بتنی دو قوسی با ارتفاع ۱۲۸ متر از کف پی، تاج سد ۴۲۵ متر، عرض تاج سد ۵ متر، پی سد ۱۶ متر و حداکثر رقوم آب در آن ۴۷۳ متر است. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان مازندران را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه آورده شده است. با استفاده از آزمون ماکوس کفایت داده‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد حداقل سال‌های آماری ۹ سال است که طول دوره آماری ۱۰ ساله در این تحقیق، برای تجزیه و تحلیل کافی است. همچنین با استفاده از XLSTAT 2017 آزمون نرمال بودن داده‌های رطوبت نسبی، دمای حداقل، دمای حداکثر، بارندگی، ساعت آفتابی و سرعت باد بررسی شد. نتایج آزمون‌های مختلف مثل شاپیرو- ویلک، اندرسون- دارلینگ، لیلی فورس و ژارک- برا نشان داد که همگی داده‌های ایستگاه موردمطالعه نرمال هستند؛ بنابراین می‌توان از آزمون های پارامتریک نظیر آزمون تحلیل واریانس یک‌طرفه (ANOVA) برای مقایسه روش‌های مختلف استفاده نمود. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه در جدول ۱ و مقادیر میانگین تبخیر ماهانه و سالانه اندازه‌گیری شده از تشت تبخیر در طول دوره آماری ۱۰ ساله در ایستگاه سلیمان‌تنگه در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی منطقه مورد مطالعه

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	مختصات جغرافیایی						ارتفاع از سطح آب های آزاد (متر)	سال تأسیس	کد ایستگاه
		طول شرقی			عرض شمالی					
		ثانیه	دقیقه	درجه	ثانیه	دقیقه	درجه			
تلمادره	تبخیر سنجی	۲۴	۴۳	۵۳	۲۴	۱۳	۳۶	۱۷۴	۱۳۷۹	۳۵۱-۱۳
سلیمان تنگه	تبخیر سنجی	۵۲	۱۳	۵۳	۸	۱۵	۳۶	۴۰۰	۱۳۳۶	۰۱۹-۱۳
فریم صحرا	تبخیر سنجی	۴۲	۱۳	۵۳	۴۱	۹	۳۶	۸۶۰	۱۳۸۱	۰۳۲-۱۳
محوطه اداره ساری	تبخیر سنجی	۵۲	۰	۵۳	۴۰	۳۲	۳۶	۱۷	۱۳۶۱	۰۴۴-۱۳

جدول ۲- مقادیر میانگین ماهانه و سالانه تبخیر اندازه گیری شده از تشت در ایستگاه سلیمان تنگه در دوره ۱۰ ساله (از سال آبی ۱۳۸٤-۸۵ تا سال آبی ۹٤-۱۳۹۳) (میلی‌متر)

مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	سالانه
۴۳/۲	۲۱/۵	۱۵/۸	۱۴/۴	۲۳/۴	۳۴/۱	۴۵/۸	۵۵/۸	۷۵/۲	۷۳/۲	۹۱/۷	۷۰/۳	۵۶۴/۵



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در کشور و استان مازندران

روش انجام تحقیق

در این تحقیق با برآورد مقادیر تبخیر روزانه و ماهانه از سطح مخزن شهید رجایی طی ۱۰ سال آبی (از سال آبی ۱۳۸۴-۸۵ تا سال آبی ۹۴-۱۳۹۳) بر مبنای روابط تجربی در برآورد میزان تبخیر مورد مقایسه قرار گرفت و بهترین روابط ارائه شده است. در ادامه روش‌های مورد استفاده و نحوه محاسبات بیان شده است. برآورد مقدار تبخیر به وقوع پیوسته از سطوح آب آزاد در حوضه‌های آبخیز، نقشی مهم در مدیریت کمی و کیفی منابع آب دارد. در مطالعات مرتبط با بیلان جرم دریاچه‌ها و مخازن سدها، حجم آب ازدست‌رفته به واسطه‌ی تبخیر یکی از پارامترهای مهم در معادله‌ی بیلان است. در بسیاری از مطالعات مرتبط با هیدرولوژی حوضه‌های آبخیز مانند مدل‌سازی سیستم‌های آب‌های سطحی و زیرزمینی نیز برآورد تبخیر می‌تواند حائز اهمیت باشد. در تحقیقات کشاورزی، منابع طبیعی و حفاظت آب و خاک نیز آگاهی از مقدار تبخیر - تعرق به وقوع پیوسته اهمیت زیادی دارد. محاسبه‌ی اتلاف آب در فرآیند تبخیر - تعرق، در بسیاری از مناطق جهان که منابع آبی محدودی دارند، برای طرح‌ریزی و مدیریت شیوه‌های آبیاری، امری لازم و ضروری است (شریفان و علیزاده، ۱۳۸۶). به طور کلی از چهار روش برای تخمین تبخیر استفاده می‌شود: الف) روش‌های تجربی که از پارامترهای هواشناسی استفاده کرده و عموماً بر پایه قانون دالتون است (Yazdani et al., 2010). ب) روش بیلان آب که بستگی به تخمین جریان ورودی و خروجی دارد. ج) روش بیلان انرژی که نیازمند تعیین تمامی اجزای موجود در رابطه با موازنه انرژی است. د) روش‌های ترکیبی برای تخمین تبخیر.

بیشتر روش‌های تجربی ارائه شده جهت تخمین تبخیر بر پایه رابطه دالتون و مبتنی بر اصل بقای جرم است. بدین صورت که سرعت تبخیر از واحد آب شیرین می‌تواند با استفاده از روش انتقال جرم بر مبنای قانون دالتون محاسبه شود:

(۱)
$$E_{f;v} = [f(u_{;v})]\{e_{sat}(T_{f;v}) - [RH][e_{sat}(T_a)]\}$$

که در آن $f(u_{;v})$ تابع باد می‌باشد و معمولاً تجربی است، RH رطوبت نسبی، $esat(T_{fw})$ و $esat(T_a)$ به ترتیب فشار بخار آب در دمای آب شیرین (T_{fw}) و دمای هوا (T_a) می‌باشد. در این رابطه عبارت $\{e_{sat}(T_{f;v}) - [RH][e_{sat}(T_a)]\}$ مربوط به کمبود بخار اشباع است. تابع باد معمولاً به‌صورت تابع خطی بیان می‌شود:

(۲)
$$f(u_{;v}) = C_1 - C_2 u_{v;}$$

که در آن C1 و C2 ضرایب تجربی هستند (Knapp, 1985). با توجه به توضیحات فوق اغلب روابط تجربی بر اساس رابطه شرح داده شده و مبتنی بر اصل بقای جرم ایجاد شدند.

تاکنون بیش از ۵۰ رابطه تجربی برای تعیین تبخیر و تعرق توسط محققین مختلف ارائه شده است. از بین روابط عملی و ساده‌ای که برای تخمین تبخیر از سطح آزاد آب ارائه شده‌اند، معادله‌های

تجربی مانند مایر، شاهتین، مارسیانو و هفنر برای برآورد روزانه تبخیر از سطح آزاد آب و روابط تجربی ایوانف و دفتر عمران آمریکا برای محاسبه ماهانه تبخیر از سطح آزاد آب، مورد استفاده قرار می‌گیرند. مهم‌ترین پارامترهای هواشناسی درگیر در تبخیر سرعت باد، رطوبت نسبی و دما می‌باشند. روابط تجربی ارائه شده با مد نظر قرار دادن هر یک از این پارامترها سعی در کاهش خطای برآورد تبخیر دارند. هر یک از این روابط بنا به شرایط آب و هوایی هر منطقه مورد تأیید قرار گرفته است، به‌عنوان مثال رابطه ایوانف برای مناطقی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد شده است:

جدول ۳- روابط تجربی برآورد میزان تبخیر از سطح آزاد

نام رابطه	رابطه
مایر	$E = \left(1 + \frac{U_2}{16}\right).C.(e_s - e_a)$
مارسیانو	$E = 0.03U_2(e_s - e_a)$
شاهتین	$E = (0.116 + 0.017U_2)(e_s - e_a)$
هفنر	$E = 0.028U_2(e_s - e_a)$
ایوانف	$E = 0.0018(T + 25)^2(100 - RH)$
دفتر عمران آمریکا	$E = 0.883(4.57T + 43.3)$

پارامترهای روابط فوق عبارتند از E: تبخیر از سطح آزاد آب بر حسب میلی‌متر در روز، U_2: سرعت باد در ارتفاع دو متری از سطح زمین بر حسب کیلومتر بر ساعت، U_{10}: سرعت باد در ارتفاع ده متری از سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه ea و e: به‌ترتیب فشار بخار اشباع و فشار واقعی بخار آب در هوا بر حسب میلی‌متر جیوه و C: ضریبی است که برای دریاچه‌های عمیق ۰/۳۶ و برای دریاچه های کم‌عمق ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین پارامترهای مربوط به روابط تجربی ایوانف و دفتر عمران آمریکا، E: تبخیر از سطح آزاد آب بر حسب میلی‌متر در ماه، T: میانگین دمای هوا بر حسب درجه سانتی‌گراد، و RH: میانگین رطوبت نسبی هوا بر حسب درصد است.

معیارهای سنجش خطای برآورد و مقایسه مدل‌ها

در این تحقیق، به منظور تحلیل خطای حاصل از روش‌ها و مدل های پیشنهادی، از معیارهای آماری زیر در هر یک از آزمون‌ها استفاده شده است:

الف) میانگین مربعات خطا[1]

این معیار یکی از بهترین معیارها برای مقایسه و انتخاب مناسب ترین روش است و برای محاسبه آن از رابطه شماره ۳ استفاده می شود. در هر مدلی که مقدار میانگین مربعات خطا کمتر باشد، آن مدل نسبت به بقیه از دقت بالاتری برخوردار است (کیم و جی، ۲۰۰۹).

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{N} \quad (۳)$$

که در آن؛ MSE میانگین مربعات خطا، P_i مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل، O_i مقادیر مشاهده شده (واقعی)، N تعداد داده‌ها در هر بخش از مدل است.

ب) ضریب تبیین[2]

این پارامتر در مقایسه‌های آماری کاربرد فراوانی دارد از رابطه شماره ۴ به‌دست می‌آید:

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})\right]^2}{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2 . \sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2} \quad (۴)$$

که در آن؛ R^2 ضریب تبیین، $\bar{P}$ میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل و $\bar{O}$: میانگین مقادیر مشاهده شده است. دامنه تغییرات این کمیت از صفر تا یک است. مقادیر نزدیک‌تر به عدد یک، نشان دهنده تطابق بهتر مدل و مشاهدات است (قهرمان و ثامتی، ۲۰۱۴).

ج) کارآیی مدل[3]

مقدار آن نشان دهندهٔ صحت برازش داده‌ها است و از مقدار منفی بی‌نهایت در بدترین حالت تا مقدار یک در زمان برازش کامل داده‌ها تغییر می‌کند و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

1- Mean of Square Error (MSE)

2- Determination Coefficient (R2)

3- Efficiency

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(O_i - \overline{O})^2} \quad (۵)$$

که در آن؛ EF شاخص کارآیی مدل است.

نتایج و بحث

تبخیر روزانه

به منظور تعیین دقت برآورد و تحلیل خطای حاصل از روش‌های مختلف تجربی از شاخص‌های آماری مختلفی از جمله؛ میانگین مربعات خطا، ضریب تبیین و کارآیی مدل استفاده شد. نتایج حاصل از محاسبه معیارهای ذکر شده در تعیین تبخیر روزانه به روش‌های مختلف تجربی در ایستگاه‌های سلیمان تنگه، محوطه اداره ساری، فریم صحرا و تلمادره در جدول ۴ ارائه شده است.

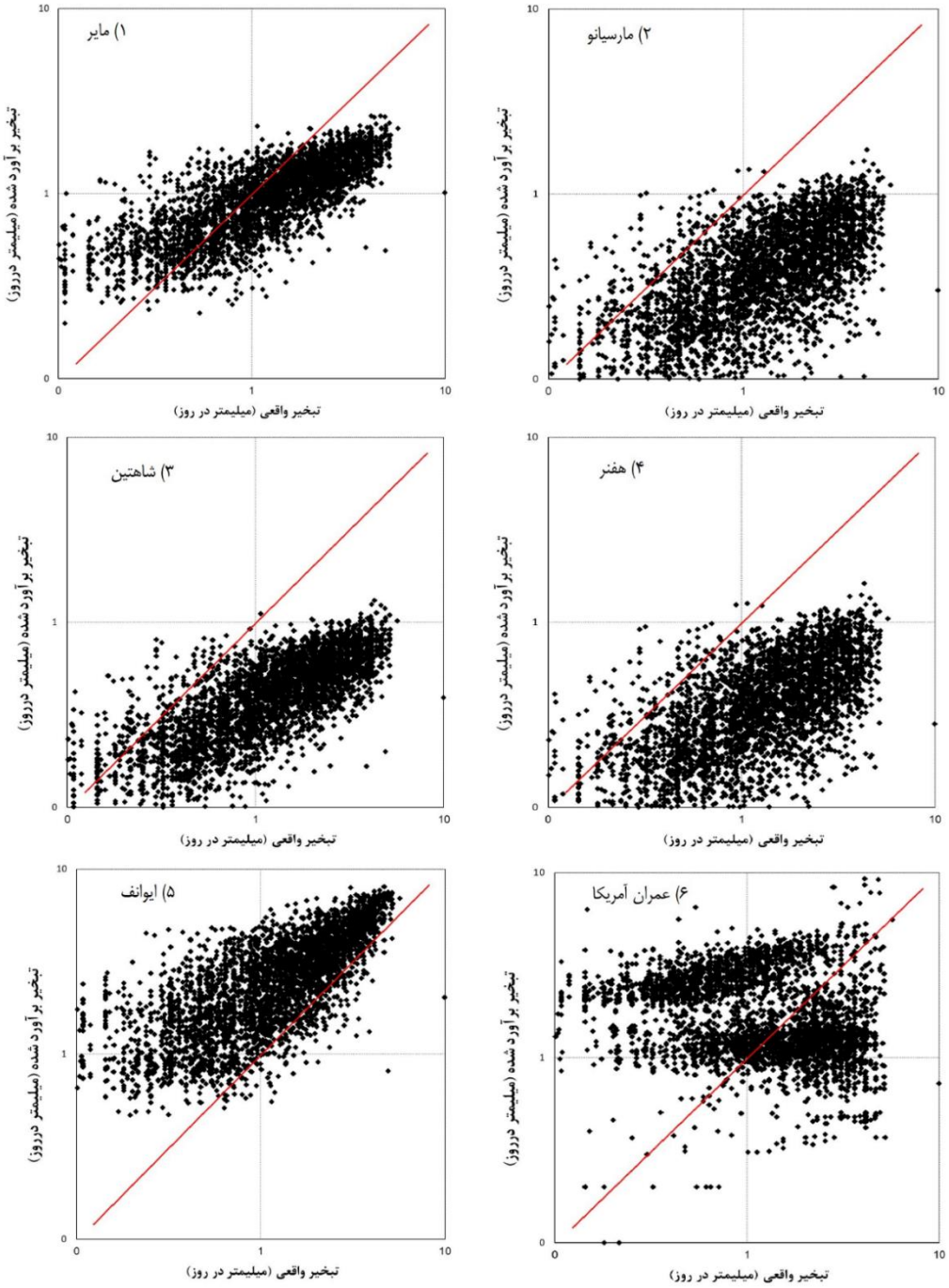
با توجه به جدول شماره ۴، روش‌های مایر و ایوانف بهتر از سایر روش‌های تجربی، تبخیر روزانه از سطح آزاد آب را برآورد نموده‌اند. به‌طوری که در ایستگاه سلیمان تنگه روش مایر (با پارامترهای ورودی سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع)، با معیارهای آماری MSE=1.00، R^2=0.78 و EF=0.26 بهترین عملکرد در برآورد میزان تبخیر روزانه را دارد.

به همین ترتیب در ایستگاه محوطه اداره ساری روش مایر (با پارامترهای ورودی سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع)، با معیارهای آماری MSE=1.36 و R^2=0.83 بهترین عملکرد در برآورد میزان تبخیر روزانه را دارد.

همچنین با توجه به جدول شماره ۴ در ایستگاه فریم صحرا روش مایر (با پارامترهای ورودی سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع)، با معیارهای آماری R^2=0.8 و EF=0.1 بهترین عملکرد در برآورد میزان تبخیر روزانه را دارد.

جدول ٤- شاخص‌های آماری حاصل از روش‌های تجربی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقایسه با تبخیر روزانه از تشت

ایستگاه	روش تجربی	MSE	R^2	EF
سلیمان تنگه	مایر	۱/۰۰	۰/۷۸	۰/۲۶
	مارسیانو	۲/۳۲	۰/۶۲	-۰/۷۲
	شاهتین	۲/۲۷	۰/۷۳	-۰/۶۸
	هفنر	۲/۴۰	۰/۶۲	-۰/۷۷
	ایوانف	۲/۵۷	۰/۷۹	-۰/۹۱
	عمران آمریکا	۲/۹۴	۰/۱۷	-۱/۱۸
محوطه اداره ساری	مایر	۱/۳۶	۰/۸۳	۰/۲۴
	مارسیانو	۳/۰۲	۰/۶۸	-۰/۶۸
	شاهتین	۲/۹۷	۰/۷۹	-۰/۶۵
	هفنر	۳/۱۲	۰/۶۸	-۰/۷۳
	ایوانف	۱/۶۷	۰/۸۱	۰/۰۷
	عمران آمریکا	۳/۸۲	-۰/۴۱	-۱/۱۳
فریم	مایر	۱/۶۰	۰/۸۰	۰/۱۰
	مارسیانو	۲/۹۹	۰/۶۴	-۰/۶۹
	شاهتین	۲/۹۶	۰/۷۶	-۰/۶۷
	هفنر	۳/۰۷	۰/۶۴	-۰/۷۳
	ایوانف	۰/۷۶	۰/۷۶	۰/۵۷
	عمران آمریکا	۲/۹۶	-۰/۲۸	-۰/۶۷
تلمادره	مایر	۲/۹۰	۰/۸۱	۰/۱۲
	مارسیانو	۴/۵۰	۰/۶۹	-۰/۳۶
	شاهتین	۴/۴۶	۰/۷۸	-۰/۳۵
	هفنر	۴/۵۸	۰/۶۹	-۰/۳۸
	ایوانف	۲/۹۰	۰/۶۹	۰/۱۲
	عمران آمریکا	۴/۰۶	-۰/۰۱	-۰/۲۳



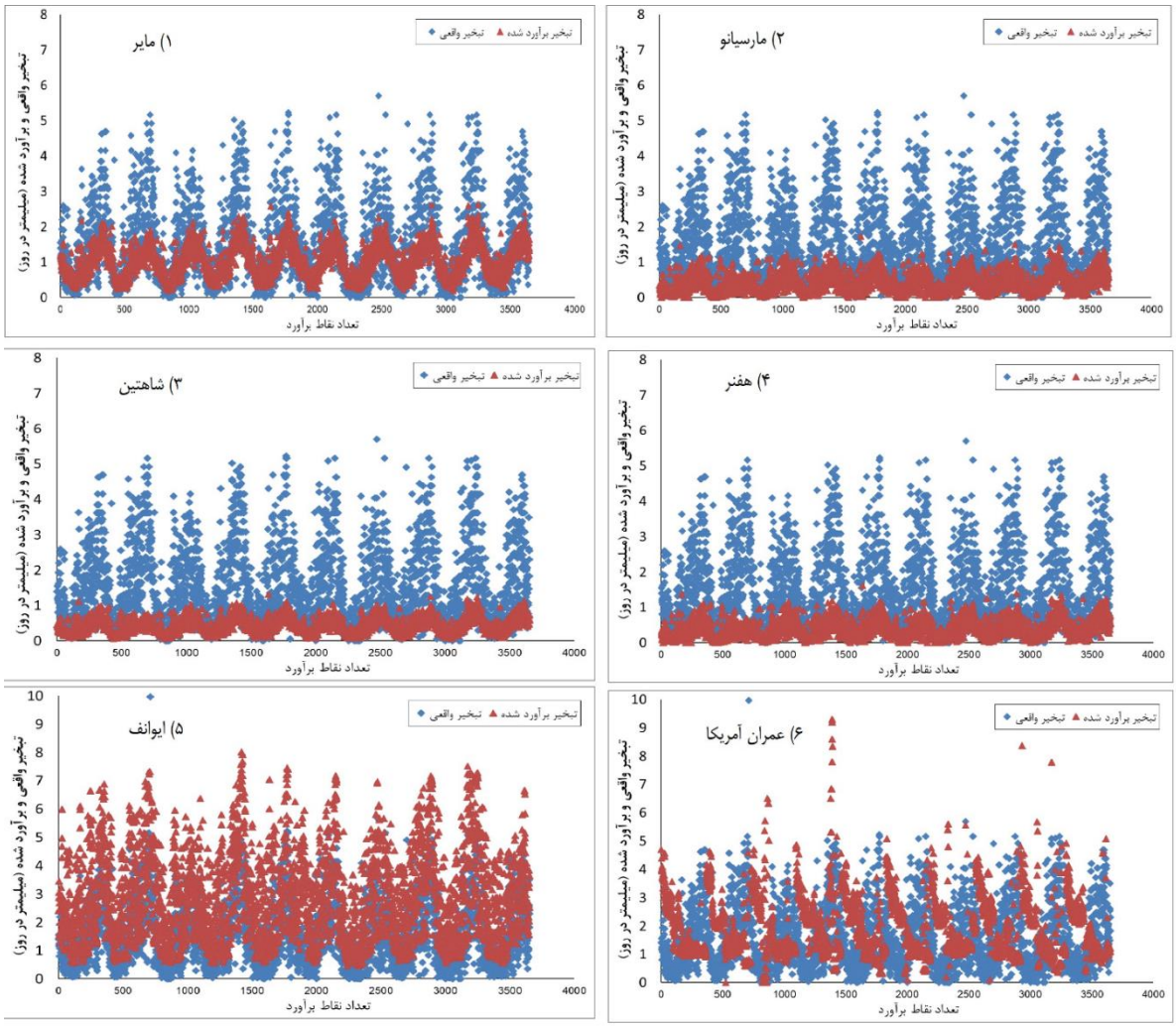
شکل ۲- نمودار پراکندگی داده‌های مشاهده‌ای و برآوردی تبخیر روزانه حول خط یک به یک با روش‌های تجربی مورد مطالعه در ایستگاه سلیمان تنگه

در ایستگاه تلمادره روش مایر (با پارامترهای ورودی سرعت باد و کمبود فشار بخار اشباع)، با معیارهای آماری MSE=2.90، R^2=0.81 و EF=0.12 بهترین عملکرد در برآورد میزان تبخیر روزانه را دارد.

در شکل ۲ نمودار پراکندگی داده‌های مشاهده شده و برآورد شده تبخیر روزانه به روش مختلف تجربی نسبت به خط یک به یک رسم شده است. جهت مشاهده بهتر پراکندگی داده ها از نمودار لگاریتمی استفاده شد. همان طوری که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، پراکندگی داده‌ها در اطراف خط یک به یک در روش مایر نسبت به دیگر روش‌های تجربی کمتر است و به

نظر می‌رسد این مدل بهتر از بقیه روش‌ها، تبخیر روزانه را برآورد کرده است.

همچنین در شکل ۳ میزان تبخیر روزانه مشاهداتی و برآورد شده به شش روش تجربی در ایستگاه سلیمان تنگه نشان داده شده است. با توجه به شکل، روش مایر میزان تبخیر روزانه را تقریباً در محدوده تبخیر روزانه مشاهداتی برآورد نموده و عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها داشته است. ستاری و همکاران (۱۳۹۳) نیز در تحقیق خود روش مایر را مناسب‌ترین روش برای این منظور دانسته‌اند. بر اساس شکل ۲ مشاهده می‌شود که روش‌های مارسیانو، شاهتین و هفنر کمتر از مقدار واقعی تبخیر از سطح آزاد را برآورد نموده‌اند و برعکس روش ایوانف بیشتر از مقدار واقعی تبخیر از سطح آزاد را برآورد کرده است. علت بیش‌برآوردی روش ایوانف می‌تواند ناشی از ماهیت پارامترهای استفاده شده در رابطه مذکور باشد که از رطوبت نسبی و همچنین دما برای محاسبه تبخیر روزانه استفاده می‌کند. برای روش دفتر عمران آمریکا نیز تقریباً رابطه همبستگی معناداری برای ایستگاه مورد مطالعه به‌دست نیامد.



شکل ۳- نمودار پراکنش نقاط تبخیر روزانه شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای به روش‌های تجربی در ایستگاه سلیمان تنگه

تبخیر ماهانه

جهت انتخاب بهترین مدل تجربی برای برآورد تبخیر ماهانه در ایستگاه مورد مطالعه از شاخص‌های آماری MSE، R^2 و EF استفاده شد. در بین روش‌های تجربی و با توجه به معیارهای پیش‌گفته روش مایر به‌عنوان بهترین روش محاسبه تبخیر ماهانه انتخاب شد. همان طور که در جدول شماره ۵ ملاحظه می‌شود مقادیر معیارهای MSE، R^2 و EF برای ایستگاه سلیمان تنگه به ترتیب ۴۳۶/۹، ۰/۹۷ و ۰/۳۰ به‌دست آمد.

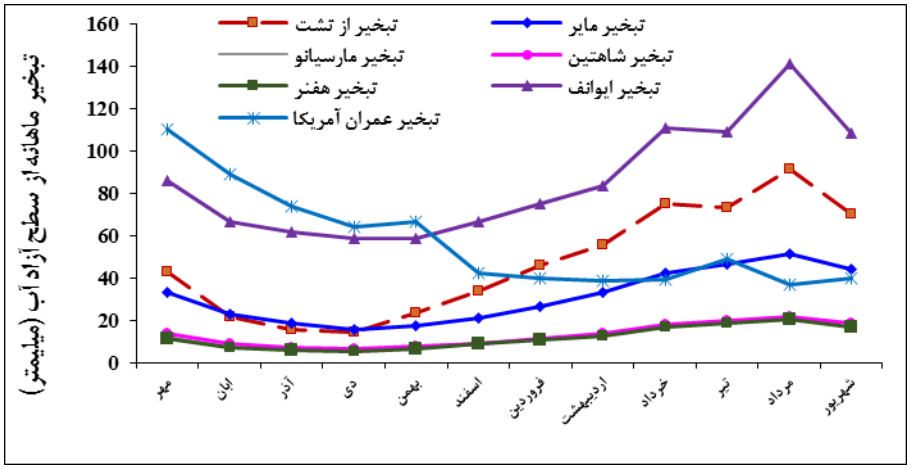
همچنین در ایستگاه محوطه اداره ساری روش مایر به‌عنوان بهترین روش محاسبه تبخیر ماهانه انتخاب شد. مقادیر معیارهای

MSE، R^2 و EF به ترتیب ۸۴۴/۹، ۰/۹۸ و ۰/۲۸ به‌دست آمد. به همین ترتیب در ایستگاه فریم صحرا روش ایوانف به‌عنوان بهترین روش محاسبه تبخیر ماهانه انتخاب شد. مقادیر معیارهای MSE، R^2 و EF به ترتیب ۲۵۳/۰، ۰/۹۸ و ۰/۷۱ به‌دست آمد. در نهایت برای ایستگاه تلمادره روش ایوانف به‌عنوان بهترین روش محاسبه تبخیر ماهانه انتخاب شد. مقادیر معیارهای MSE، R^2 و EF به ترتیب ۹۳۰/۷، ۰/۹۹ و ۰/۵۲ به‌دست آمد.

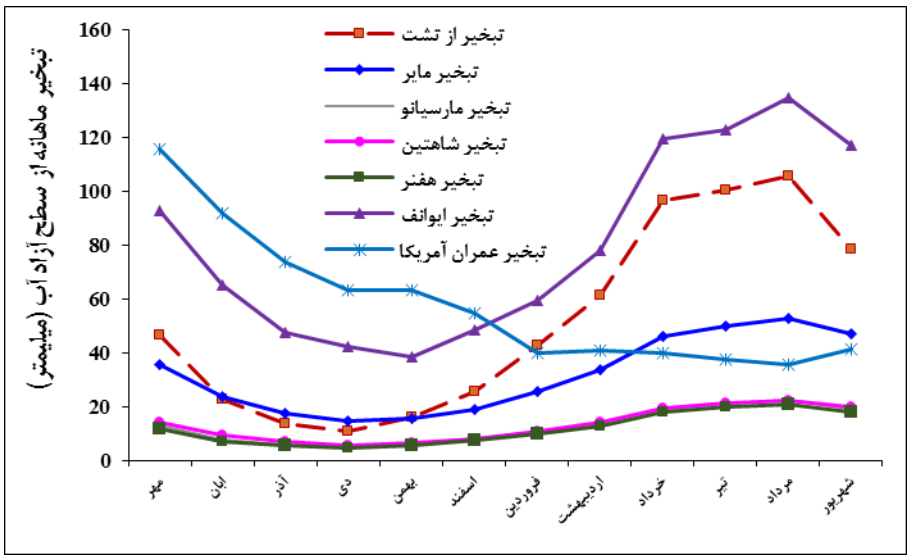
شکل‌های شماره ۴ الی ۷ مقایسه تغییرات ماهانه تبخیر مشاهده ای و برآوردی را به‌ترتیب برای ایستگاه‌های سلیمان تنگه، محوطه اداره ساری، فریم صحرا و تلمادره نشان می‌دهد. همان‌طوری که در شکل‌های مذکور ملاحظه می‌شود، همانند نتایج تبخیر روزانه، روابط تجربی میزان تبخیر ماهانه را در ماه‌های تابستان کمتر از واقعیت شبیه‌سازی می‌کند که در روش مایر این اختلاف نسبت به روش‌های دیگر کمتر است. مقایسه مذکور نشان‌دهنده قدرت و برتری روش مایر نسبت به سایر روش‌های تجربی است که به‌این ترتیب نتایج مطالعه حاضر با مطالعات انجام شده توسط نجفوند دریکوندی و اسلامی (۱۳۹۵) تطابق دارد. از دیگر نتایج برآورد تبخیر ماهانه می توان به کارایی پایین روش دفتر عمران آمریکا اشاره کرد. از آنجایی که روش فوق تنها با استفاده از پارامتر دما تبخیر از سطح آزاد را محاسبه می‌کند، لذا یک پارامتری بودن این معادله دلیل بر دقت پایین آن در برآورد تبخیر از سطح آزاد است که با نتایج امام‌دوست و همکاران (۱۳۹۵) همخوانی دارد.

جدول ۵ – شاخص‌های آماری حاصل از روش‌های تجربی ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقایسه با تبخیر ماهانه از تشت

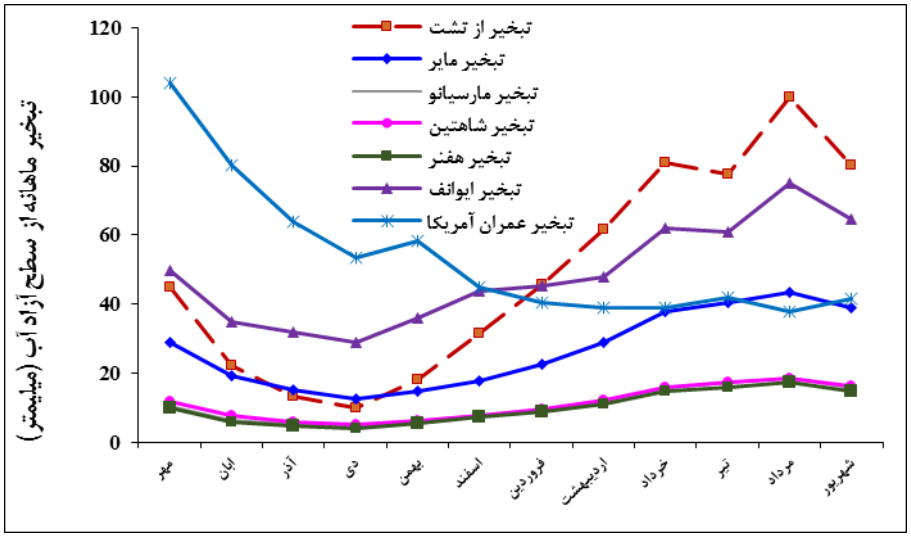
ایستگاه	روش تجربی	MSE	R^2	EF
سلیمان تنگه	مایر	۴۳۶/۹	۰/۹۷	۰/۳۰
	مارسیانو	۱۵۵۶/۷	۰/۹۹	-۱/۵۰
	شاهتین	۱۵۴۳/۸	۰/۹۸	-۱/۴۶
	هفنر	۱۶۳۹/۷	۰/۹۹	-۱/۶۲
	ایوانف	۱۵۳۹/۷	۰/۹۷	-۱/۴۶
	عمران آمریکا	۱۹۲۰/۲	-۰/۵۸	-۲/۰۶
محوطه اداره ساری	مایر	۸۴۴/۹	۰/۹۸	۰/۲۸
	مارسیانو	۲۳۲۲/۴	۰/۹۹	-۰/۹۷
	شاهتین	۲۲۹۴/۷	۰/۹۸	-۰/۹۵
	هفنر	۲۴۱۳/۹	۰/۹۹	-۱/۰۵
	ایوانف	۹۱۷/۱	۰/۹۶	۰/۲۲
	عمران آمریکا	۲۷۳۱/۱	-۰/۵۸	-۱/۳۲
فریم صحرا	مایر	۸۴۸/۷	۰/۹۸	۰/۰۲
	مارسیانو	۲۰۴۹/۷	۰/۹۹	-۱/۳۸
	شاهتین	۲۰۲۷/۶	۰/۹۸	-۱/۴۵
	هفنر	۲۱۲۱/۳	۰/۹۹	-۱/۴۶
	ایوانف	۲۵۳/۰	۰/۹۸	۰/۷۱
	عمران آمریکا	۱۸۲۸/۳	-۰/۴۹	-۱/۱۲
تلمادره	مایر	۱۶۹۵/۴	۰/۹۹	۰/۱۲
	مارسیانو	۳۰۸۳/۲	۰/۹۹	-۰/۶۰
	شاهتین	۳۰۶۳/۵	۰/۹۹	-۰/۵۹
	هفنر	۳۱۶۲/۲	۰/۹۹	-۰/۶۴
	ایوانف	۹۳۰/۷	۰/۹۹	۰//۵۲
	عمران آمریکا	۲۴۶۸/۰	-۰/۱۳	-۰/۲۸



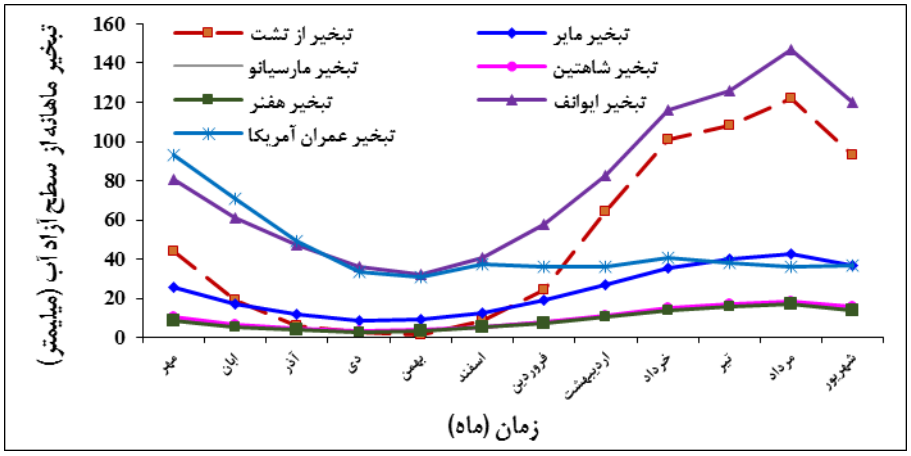
شکل ٤- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه تبخیر ماهانه در ایستگاه سلیمان تنگه



شکل ٥- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه تبخیر ماهانه در ایستگاه محوطه اداره ساری



شکل ٦- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه تبخیر ماهانه در ایستگاه فریم صحرا



شکل ۷- مقایسه روش‌های مختلف محاسبه تبخیر ماهانه در ایستگاه تلمادره

نتیجه‌گیری

در این تحقیق عملکرد روابط تجربی در برآورد تبخیر روزانه و ماهانه از سطح مخزن سد شهید رجائی در استان مازندران بر مبنای روش تشت تبخیر بررسی شد و عملکرد روابط تجربی برآورد تبخیر با استفاده از شاخص‌های آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه-سازی تبخیر روزانه نشان داد که در ایستگاه‌های مورد مطالعه سلیمان‌تنگه روش ایوانف با ضریب تعیین ۰/۷۹، محوطه اداره ساری روش مایر با ضریب تعیین ۰/۸۳،فریم صحرا روش مایر با ضریب تعیین ۰/۸۰ و تلمادره روش مایر با ضریب تعیین ۰/۸۱، به عنوان بهترین رابطه به منظور برآورد تبخیر روزانه انتخاب گردیدند. همچنین در ایستگاه سلیمان‌تنگه برای شبیه سازی تبخیر ماهانه روش مایر با ضریب تعیین ۰/۹۸ و کمترین MSE (۴۳۷/۹) به عنوان بهترین رابطه انتخاب شد. سایر ایستگاه‌ها نیز به‌همین صورت روش مایر با توجه به شاخص‌های آماری به عنوان بهترین رابطه برگزیده شد. از دیگر نتایج گرفته شده در این تحقیق برآورد نسبتاً دقیق تبخیر ماهانه در فصل بهار و تابستان توسط رابطه ایوانف و همچنین زمستان و پاییز به روش مایر می‌باشد. ستاری و همکاران (۱۳۹۳) نیز در تحقیق خود روش مایر را مناسب‌ترین روش برای این منظور دانسته‌اند. جهرمی (۱۳۹۴) مایر و ایوانف و یزدانی و همکاران (۱۳۹۰)، زارع ابیانه و همکاران (۱۳۸۴) نیز روش ایوانف را مناسب تشخیص داده‌اند. همچنین از بین روش‌های مورد استفاده در این مطالعه، روش دفتر عمران آمریکا به‌عنوان ضعیف‌ترین معادله با توجه به یک پارامتری بودن آن جهت برآورد تبخیر ماهانه مشخص شد که بایستی در استفاده از این روش برای برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در منطقه احتیاط به عمل آورد.

منابع

امام‌دوست، ش.، شاهنظری، ع و تقوی، ج. ۱۳۹۵. برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در دشت مازندران (آبندان دازمیرکنده) و مقایسه آن با هفت روش تجربی. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز. ۱۸ (۹): ۲۴۹-۲۴۱.

خوشحال جهرمی،ف. ۱۳۹۴. تعیین بهترین روش تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب در دو اقلیم متفاوت از استان فارس (مطالعه موردی شهرستان آباده و لار). سومین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار، تهران.

زارع ابیانه، ح.، مقدم‌نیا، ع.، بیات ورکشی، م.، قاسمی، ع. و شادمانی، م. ۱۳۸۹. تغییرات مکانی تبخیر از تشت و مقایسه آن با مدل های برآورد تبخیر در ایران. دانش آب و خاک. ۲۰(۴): ۱۱۳-۱۲۹.

ستاری، م.ت.، احمدی‌فر، و. و پاشاپور خلف انصار، ر. ۱۳۹۳. مدل سازی تلفات تبخیر از مخزن سد علویان با استفاده از مدل درختی M5 و مقایسه آن با روش‌های تجربی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران. ۵ (۱۷): ۱۲۲-۱۱۰.

سلامی، م.، قربانی، ب.، رادفر، م. و صمدی بروجنی، ح. ۱۴۰۱. بررسی و تحلیل حساسیت روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب سد چغاخور. نشریه علوم مهندسی آبیاری. ۴۵ (۳): ۴۵-۳۱.

سیدی، ن. ۱۴۰۰ . برآورد تلفات تبخیر از سطح آزاد آب مخزن سد شهید رجایی با استفاده از روش‌های تجربی و شبکه عصبی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

شریفان، ح. و علیزاده، ا. ۱۳۸۶. بررسی آب مورد نیاز گیاهان در دوره های مختلف حداکثر نیاز آبی، مجله آبیاری و زهکشی ایران.

۲(۱): ۹۴-۸۷.

میرمحمد صادقی، ا. قبادی‌نیا، م. و رحیمیان، م.ح. ۱۳۹۸. برآورد تبخیر از سطح آزاد دریاچه سد زاینده‌رود با استفاده از سبال و مقایسه با روشهای تجربی. نشریه آب و خاک. ۳۳(۴): ۵۴۸-۵۳۷.

نجفوند دریکوندی، م. و اسلامی، ح. ۱۳۹۵. مقایسه روش‌های تجربی برآورد تبخیر از سطح آزاد آب (مطالعه موردی: سد تنظیمی دز). فصلنامه علمی و تخصصی مهندسی آب. ۴ (۲): ۷۳-۶۵.

Abou El Magd, I.H. and E.M. Ali. 2012. Estimation of the evaporative losses from Lake Nasser, Egypt using optical satellite imagery. International Journal of Digital Earth. 5 (2): 133-146.

Burn, D.H. and N.M. Hesch. 2007. Trends in evaporation for the Canadian Prairies. Journal of Hydrology, 336: 61-73.

Eslamian, S.S, S.A. Gohari, M. Biabanaki and R. Malekian. 2008. Estimation of Monthly Pan Evaporation Using Artifivial Neural Networks and Support Vector Machines. Journal of Applied Sciences. 8 (1): 3497-3502.

Jalali Koutenai, N. and A.A. Naseri. 2010. Study the most appropriate method to determine the potentialevapotranspiration (In paddy fields). The first national conference on costal land water resources. Management. Sari, Iran, (In Persian).

Ghahreman, N., and Sameti, M. 2014. Comparison of Model Tree and Artificial Neural Network for Estimating Potential Evapotranspiration in Semi-arid Climates. Department of Irrigation and Reclamation Engineering. University of Tehran, Karaj. Iran.

Kim, S., and Jee, H. 2009. An Expansion of the Ungaged Pan Evaporation Using Neural Network Model in Rural Regions, South Korea Word Environmental and Water Resources Congress.

Knapp, H.V. 1985. Evaporation and transpiration. pp. 537-554, In: D. D. Houghton (Ed.) Handbook of Applied Meteorology. John Wiley and Sons, New York.

Tabari, H., S. Marofi and A.A. Sabziparvar. 2010. Estimation of daily pan evaporation using artificial neural network and multivariate non-linear regression. Irrigation Science. 28: 399-406.

Windham, J.R. and J.B. Stall. 1967. Lake evaporation in Illinois. Report of Investigation 57. State ofIllinois. Department of Registration and Education.

Yazdani, V., B. Ghahraman and K. Davari. 2010. Determination of the best experimental method forestimating the evaporation for the free surface of Amol paddy based on sensitivity analysis and comparisonof it with the result of artificial neural network. Iran Water Research Journal. (7): 47-58 (In Persian).

Wang, J., T.W. Sammisa and V.P. Gutschick. 2008. A Remote Sensing Model Estimating Water Body Evaporation. International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, Beijing, China.

Iranian Journal of Irrigation and Drainage
No.3, Vol. 17, Aug.-sEP. 2023, p. 439-451

نشریه آبیاری و زهکشی ایران
شماره۳، جلد ۱۷، مرداد - شهریور ۱۴۰۲، ص. ۴۵۱-۴۳۹

Investigation of the Performance of Experimental Equations in Estimating Evaporation Losses from the Pan in the Area of Shahid Rajaei Dam Lake

S.N. Seyedi[1], R. Fazloula[2*], M. Masoudian[3], E. Kia[4]
Recived: Oct.28, 2022 Accepted: Feb.18, 2023

Abstract

Evaporation is one of the most effective and massive loss factors in water resources, and with its accurate calculation, effective solutions can be implemented to reduce the effects of drought and to protect and efficiently manage water resources. In this research, the common experimental relationships in estimating the daily and monthly evaporation rate for four stations of Suleiman Tange, Mohavvateh Edareh Sari, Farim Sahra and Telmadarreh were investigated and evaluated based on the observed data of the evaporation pan, and the best experimental relationships for estimating the daily and monthly evaporation values was introduced. For this purpose, the 10-year statistics of the measured values of evaporation from the pan with the values calculated from the experimental methods of Meyer, Marciano, Shahtin, Hefner, Ivanov, and the American civil engineering office, with two-time scales, daily and monthly, with the aim of estimating losses due to evaporation it was compared from the lake level of Shahid Rajaei Sari Dam. Then, the performance of empirical relationships was evaluated based on MSE, R^2 and EF statistics. The results of the evaluation of the experimental relationships of evaporation calculation showed that Meyer's method is the best relationship for estimating daily evaporation in the studied stations. After Meyer's empirical relation, Ivanov's relation was introduced as the best relation. The values of MSE, R^2 and EF statistics in the estimation of monthly evaporation using Meyer's relation at Suleiman Tangeh station, which is the closest station to Shahid Rajaei dam, were obtained as 436.9, 0.97, and 0.3, respectively. Also, among the experimental methods used in this study, the American Civil Engineering Bureau method was determined as the weakest equation for estimating monthly evaporation at Suleiman Tangeh station.

Keywords: Daily Evaporation, Evaporation Pan, Experimental Equations, Monthly Evaporation,

1- M.Sc. Graduated in Water Resources, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
2- Associate professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
3- Associate professor, Water Engineering Department, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran
4- Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Mazandaran Agriculture and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Sari, Iran
(*- Corresponding Author Email: raminfazl@yahoo.com & r.fazloula@sanru.ac.ir)